

بررسی آزمایشگاهی پرش هیدرولیکی در سرریزهای جانبی

کامران محمدی^{1*} و علی حسین‌زاده دلیر²

تاریخ دریافت: 91/05/22 تاریخ پذیرش: 91/12/22

¹ دانشجوی دکتری رشته سازه‌های آبی، گروه سازه‌های آبی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز

² دانشیار گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: kamranmohammadi.km@gmail.com

چکیده

سرریز جانبی یکی از سازه‌هایی است که به طور گسترده در آبگیرها مورد استفاده قرار می‌گیرد. به علاوه این سازه به عنوان یک سازه حفاظتی در موارد گوناگون و به منظور تخلیه آب اضافی به کار می‌رود. در برخی موارد ممکن است در طول جریان متغیر مکانی روی سرریز جانبی، پرش هیدرولیکی رخ دهد و بررسی‌ها نشان می‌دهد تا کنون تحقیقات بسیار اندکی بر روی این حالت از جریان انجام پذیرفته است. در این تحقیق پروفیل سطح آب و ضریب تخلیه سرریز جانبی برای شرایطی که در جریان متغیر مکانی پرش هیدرولیکی رخ دهد بررسی گردید. شاخص‌های آماری $RMSE$ و R^2 بین مقادیر مشاهداتی و مقادیر حاصل از رابطه ارائه شده برای ضریب تخلیه سرریز جانبی در پرش هیدرولیکی متغیر مکانی به ترتیب برابر با 0/005 و 0/778 بدست آمد. همچنین روش جدید "سابرامانیای واسنجی شده" ارائه شده است که شکل پروفیل سطح آب پرش هیدرولیکی در سرریز جانبی را معین می‌سازد. این روش هم‌خوانی بسیار مناسبی با داده‌های آزمایشگاهی دارد. مطالعات حاضر نشان داد پرش هیدرولیکی در جریان متغیر مکانی همراه با نوساناتی در سطح آب بوده و شکل نسبتاً ثابتی دارد.

واژه‌های کلیدی: پرش هیدرولیکی، سرریز جانبی، ضریب تخلیه، روش سابرامانیای واسنجی شده

Experimental Investigation of Hydraulic Jump in Side Weirs

K Mohammadi^{1*} and A Hosseinzadeh Dalir²

Received: 12 August 2012 Accepted: 12 March 2013

¹ Ph.D Student, Hydraulic Structure Dept., School of Water Sci. Engin., Shahid Chamran Univ., Ahwaz, Iran

² Assoc. Prof., Water Engin. Dept., Univ. of Tabriz, Tabriz, Iran

* Corresponding Author Email: Kamranmohammadi.km@gmail.com

Abstract

Side weir as a hydraulic structure is widely used in water intakes. In addition, this structure is used as a protective structure at the end of the main channels to discharge excess water flow. In some cases a hydraulic jump is possible to occur along the spatially varied flow over the side weir and studies show that a few literatures are available for this condition of flow in the side weirs. This paper discusses water surface profile and discharge coefficient of the side weir under the condition of hydraulic jump occurrence in spatially varied flow. Values of the statistic indices R^2 and RMSE between the observed and calculated quantities of discharge coefficient for the side weir were 0.776 and 0.005 respectively. A new method called "Calibrated Subramanya Method" was also developed to define the shape of water surface profile of hydraulic jump in side weirs. This method showed a good agreement with the experimental data. Studies show that the hydraulic jump in spatially varied flow has almost a constant shape with oscillations on the water surface.

Keywords: Discharge coefficient, Hydraulic jump, Side weir, Calibrated Subramanya method

مقدمه

گسترده از آن استفاده می‌شود، سرریز جانبی¹ است. جریان بر روی سرریز جانبی از نوع جریان متغیر مکانی² است. در جریان متغیر مکانی، بدلیل خروج آب از کانال بوسیله سرریز جانبی، خصوصیات جریان از جمله دبی، عمق آب و سرعت در مسیر جریان متغیر می‌باشد (قبادیان و همکاران 1387).

نظریه ارزشمند دیمارچی در سال 1934 را می‌توان به عنوان شروع واقعی تحقیقات در این زمینه در نظر گرفت. دیمارچی (1934) از افت انرژی در طول سرریز و برخی پارامترهای دیگر صرف نظر نمود و

برداشت آب از رودخانه‌ها، مخازن سدها و کانال‌های انتقال آب برای تامین اهداف مختلف همیشه مورد توجه بوده و آبیگری به روش ثقلی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، چرا که از مزایای مهم آن پیوسته بودن آبیگری و عدم صرف انرژی اضافی می‌باشد. یکی از روش‌های ثقلی آبیگری، آبیگری از کناره رودخانه‌ها یا کانال‌ها است که با استفاده از انواع مختلف دریچه‌ها، روزنه‌ها و سرریزها انجام می‌گیرد. یکی از انواع سرریزها که به منظور آبیگری به صورت

¹ Side weir

² Spatially varied flow (SVF)

نمودند. سامانی (1384) مدل ریاضی را بدون صحت-سنجی با مدل آزمایشگاهی برای تعیین دبی انحرافی از روی سرریز جانبی و محاسبه پروفیل سطح آب در طول آن معرفی کرد که در صورت وقوع پرش هیدرولیکی، محل و نوع پرش قابل تشخیص می‌باشد. قبادیان (1390) به کمک مدل عددی، پروفیل سطح آب را در محدوده سرریز جانبی در شرایط وجود پرش هیدرولیکی مورد بررسی قرار داد و نتایج حاصل از آن را با مدل فیزیکی صحت‌سنجی نمود.

با وجود کاربرد وسیع سرریزهای جانبی، مطالعات بر روی این نوع از سرریز کامل نشده است و رفتار هیدرولیکی این سرریزها پیچیده‌تر از آن است که به وسیله روش‌های ساده دقیقاً قابل پیش‌بینی باشد. از سوی دیگر زمانی که در این سرریزها پرش هیدرولیکی رخ دهد، بر پیچیدگی آن می‌افزاید. در این شرایط نوع خاصی از پرش در جریان متغیر مکانی به وجود می‌آید، که دبی در ابتدا و انتهای پرش یکسان نمی‌باشد.

بررسی‌ها نشان می‌دهد تا کنون بر روی حالتی از جریان که در جریان متغیر مکانی پرش هیدرولیکی رخ دهد تحقیقات بسیار اندکی انجام پذیرفته است. اما در این تحقیق هدف اصلی مطالعه آزمایشگاهی پرش هیدرولیکی در جریان متغیر مکانی می‌باشد و پروفیل سطح آب و ضریب تخلیه سرریز جانبی برای شرایطی که در جریان متغیر مکانی پرش هیدرولیکی رخ دهد مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین روشی جدید ارائه شده است که شکل پروفیل سطح آب پرش هیدرولیکی در سرریز جانبی را به خوبی تخمین می‌زند.

مواد و روش‌ها

معادلات و شرایط حاکم

معادلات حاکم بر جریان در محدوده سرریز جانبی همان معادلات جریان متغیر مکانی با کاهش دبی هستند که دیمارچی (1934) با صرف نظر کردن از افت

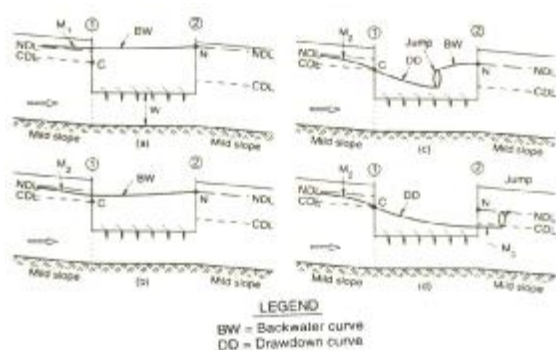
حل تحلیلی معادلات حاکم بر جریان در محدوده سرریزهای جانبی را بدست آورد (حسینی و ابریشمی 1379). سابرامانیا و آواستی (1972) معادله دیفرانسیل عمومی جریان متغیر مکانی با کاهش دبی در یک کانال مستطیلی افقی را که در آن یک سرریز جانبی با ارتفاع صفر یا محدود قرار داشت، در نظر گرفته و روابطی را برای محاسبه ضریب تخلیه سرریزهای جانبی لبه تیز ارائه نمودند. در مطالعات سوامی و همکاران (1994) روشی عددی جهت حل هم‌زمان معادله دینامیکی جریان متغیر مکانی مورد توجه قرار گرفت و همچنین برای محاسبه ضریب شدت جریان در سرریزهای لبه تیز بدون دیواره در دو طرف کانال جانبی رابطه‌ای ارائه شد. سینگ و همکاران (1994) نشان دادند که ضریب شدت جریان به صورت خطی به عدد فرود بالادست Fr_1 و نسبت ارتفاع سرریز به عمق جریان بالادست سرریز w/y_1 بستگی دارد. آلیوتو و همکاران (2001) به بررسی جنبه‌های هیدرولیکی جریان فوق بحرانی در سرریزهای جانبی منشوری پرداختند. در مطالعات رامامورتی و همکاران (2006) ضریب تخلیه اصلاح شده‌ای برای سرریزهای جانبی کانال‌های مستطیلی و دایره‌ای ارائه شده است. امیرآغلو و همکاران (2010) تاثیر هیدرولیکی سرریز کنگره‌دار¹ جانبی و پارامترهای بی‌بعد مختلف را بر ضریب دبی، پروفیل سطح آب و سرعت در طول کانال اصلی بررسی نمودند. قدسیان (1376) مفهوم جدید ضریب دبی با عنوان ضریب دبی المانی را به صورت تابعی از نسبت عمق جریان به ارتفاع سرریز ارائه نمود و روشی را برای محاسبه دبی سرریزهای جانبی معرفی کرد. برقی و صالحی (1382) نتایج بدست آمده از پروفیل طولی و عرضی سطح آب در سرریز را در مطالعات خود مد نظر قرار دادند و با در نظر گرفتن عمق روی سرریز به عنوان عمق بحرانی، دبی سرریز جانبی را محاسبه و رابطه‌ای برای محاسبه ضریب تخلیه ارائه

¹ Labyrinth weir

شد. شرایطی که برای وقوع پرش هیدرولیکی متغیر مکانی در مراجع مختلف (حسینی و ابریشمی 1379، سامانی 1384) ذکر شده است، عبارتند از:

- 1- شیب کف کانال ملایم باشد.
- 2- ارتفاع دیواره سرریز از بستر کانال w بایستی کوچکتر از عمق بحرانی y_c باشد.
- 3- بسته به ارتفاع پایاب y_t ، پرش ممکن است در محدوده سرریز یا در بیرون محدوده سرریز و در پایین دست واقع شود.

بنابراین محدوده کاری تحقیق حاضر همواره برای کانال با شیب ملایم می باشد. پروفیل های مختلف جریان در سرریز جانبی در جدول (1) به طور کامل خلاصه شده و مورد بررسی قرار گرفته اند. همچنین پروفیل های ممکن جریان در سرریز جانبی برای کانال با شیب ملایم در شکل (1) نشان داده شده اند.



شکل 1- حالت های مختلف پروفیل جریان در سرریز های جانبی کانال با شیب ملایم (شفاعی بجستان 1383).

مطالعات آزمایشگاهی

مدل های فیزیکی مختلفی از سرریز جانبی مستطیلی لبه تیز تهیه و آزمایشات در یکی از کانال های مستطیلی فلزی - شیشه ای آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز انجام شد. طول این کانال 6 متر، عرض آن 80 سانتیمتر و ارتفاع آن 50 سانتیمتر می باشد (شکل 2). جداره کانال از جنس پلکسی گلاس و فلز است و کف آن به طور

انرژی در طول سرریز و فرضیات دیگر، آن را ارائه نمود:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{s_0 - s_f - \left(\frac{aQ}{gA^2} \frac{dQ}{dx} \right)}{1 - Fr^2} \quad [1]$$

$$-\frac{dQ}{dx} = \frac{2}{3} c_m \sqrt{2g} (y - w)^{1.5} \quad [2]$$

که در این روابط y برابر عمق جریان نسبت به کف کانال در فاصله x از شروع سرریز، s_0 شیب کف کانال در محدوده سرریز، s_f شیب خط انرژی، a ضریب تصحیح انرژی، w ارتفاع لبه سرریز از کف کانال، Q ، A و Fr به ترتیب دبی کانال اصلی، سطح مقطع و عدد فرود جریان در نقطه x و c_m ضریب تخلیه سرریز می باشد که دیمارچی (1934) برای محاسبه دبی خروجی از سرریز جانبی آن را معرفی نمود و به ضریب دیمارچی معروف است.

در برخی شرایط ممکن است به دلیل وجود جریان خروجی جانبی پرش رخ دهد. رخ دادن پرش هیدرولیکی در این شرایط به هیدرولیک جریان خروجی بستگی دارد و نیازی به جریان فوق بحرانی نیست (خورچانی و بلانپاین 2004). پرش هیدرولیکی در جریان متغیر مکانی¹ نوعی از پرش هیدرولیکی می باشد که در طول پرش مقداری آب از کانال خارج می گردد. از جمله خصوصیات منحصر به فرد این نوع پرش آن است که دبی در ابتدا و انتهای پرش با یکدیگر برابر نمی باشند و مقداری آب در طول پرش از مجرا خارج می شود، لازم به ذکر است که این پدیده به صورت آزمایشگاهی به طور کامل مورد مطالعه قرار نگرفته و جزئیات آن بررسی نشده است. چون در این پرش، از دبی جریان در طول مجرا و در طول پرش کاسته می شود، این نوع پرش در این تحقیق پرش هیدرولیکی متغیر مکانی² یا به اختصار پرش متغیر مکانی نامیده

¹ Hydraulic jump in spatially varied flow

² Spatially varied hydraulic jump

کامل از جنس فلز در نظر گرفته شده است (شکل 3). ضریب زبری مانینگ کانال در محاسبات $n=0/01$ در نظر گرفته شده است. شیب کف این کانال از صفر تا 0/03 قابل تغییر است.

جدول 1- انواع پروفیل سطح آب در کانال با شیب ملایم و جریان خروجی (شفاعی بجزستان 1383).

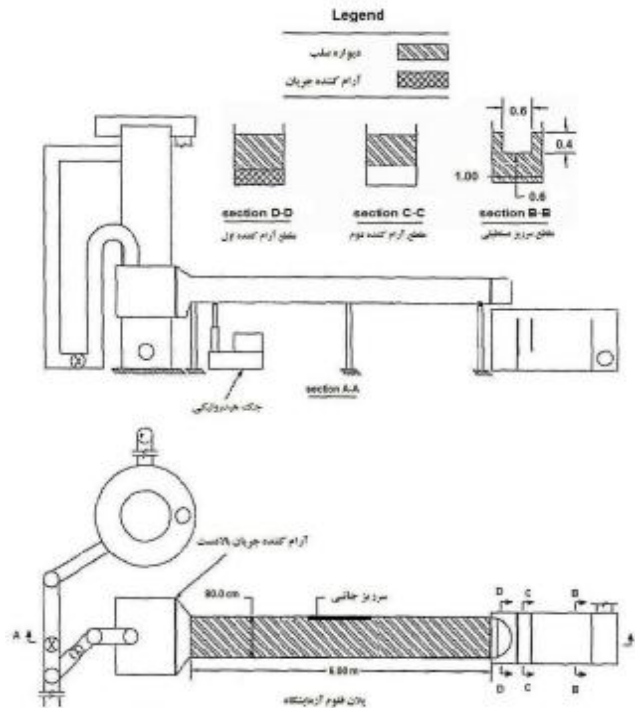
پروفیل جریان							
بازه 1	شیب	کنترل	شکل	کنترل فعال	بازه 1	تبدیل	
			a5-3	N در مقطع 2	M_1	BW	UF
			b5-3	N در مقطع 2	M_2	BW	UF
ملایم M	ملایم M	C در مقطع 1	c5-3	C در مقطع 1	M_2	DD & J	UF
			d5-3	C در مقطع 1	M_2	DD	M_3 & J

شرایط جریان در بالادست سرریز جانبی زیربحرانی است و محدوده تغییرات عدد فرود آن در جدول 2 ارائه شده است.

آب توسط یک پمپ از درون مخزنی در زیر آزمایشگاه به درون مخزنی هوایی پمپاژ می‌گردد و سپس مخزن توسط لوله و یک شیر فلکه به مخزن آرام کننده ابتدای کانال متصل می‌شود. لازم به ذکر است که



شکل 3- نمایی از کانال آزمایشگاهی.



شکل 2- نمای شماتیک کانال آزمایشگاهی.

پروفیل سطح آب در خط مرکزی کانال و در 16 مقطع توسط سطح‌سنج نقطه‌ای اندازه‌گیری شد (شکل 4). در این راستا مقطع سرریز به 10 قسمت تقسیم شده و اندازه‌گیری سطح آب در مقطع طولی بازه سرریز جانبی با فاصله 8 سانتیمتری از هم و در 10 نقطه انجام پذیرفت. چون سطح آب موج و در محل پرش بسیار متلاطم بود، برای هر نقطه حداقل 5 قرائت انجام و از ارقام بدست آمده میانگین گرفته شد.

از آنجایی که در مطالعات آزمایشگاهی امکان بروز خطا وجود دارد، 50% آزمایشاتی که در آنها پرش مشاهده و داده برداری شده به تصادف انتخاب و تکرار شده‌اند تا داده‌های آزمایشگاهی دقیقاً صحت‌سنجی شوند و نتایج بدست آمده از مدل فیزیکی با قوت بیشتری تایید گردند. مقایسه آماری داده‌های تکرارهای اول و دوم آزمایش در جدول (3) ارائه شده‌اند. پارامترهای آماری به کار رفته در جدول (3) در مرجع (محمدی 1390) به طور کامل معرفی شده‌اند.

نتایج و بحث

شکل (5) تعدادی از پرش‌های هیدرولیکی متغیر مکانی مشاهده شده در آزمایشگاه را نشان می‌دهد. همان‌گونه در شکل مشخص است، پس از وقوع پرش امواجی تشکیل می‌شود که به پایین دست انتقال می‌یابد

به منظور قرائت ارتفاع سطح آب از سطح‌سنج نقطه‌ای¹ استفاده شده است. این سطح‌سنج قادر است عمق آب را با دقت 1 میلی‌متر اندازه‌گیری نماید. همچنین سرریزهای جانبی به کار گرفته شده در آزمایشات از جنس شیشه انتخاب شد، چرا که شیشه در برابر فشار ناشی از آب پشت آن خم نمی‌شود. ضخامت شیشه‌های به کار رفته 5 میلی‌متر بود. با توجه به پیش مطالعات انجام شده، طول سرریز معادل 80 سانتیمتر برای انجام آزمایشات مناسب تشخیص داده شد. لذا سرریزهایی با طول 80 سانتیمتر و ارتفاع‌های 2/5، 3، 3/5 و 4 سانتیمتر برای انجام آزمایشات تهیه شد. سرریزها در فاصله 2/7 متر از ابتدای کانال نصب شده و آزمایشات برای دبی‌های 25، 30، 35 و 40 لیتر بر ثانیه انجام شد و در مورد هر آزمایش خاص حداقل بین 5 تا 10 شیب متفاوت مورد آزمایش قرار گرفته است. این آزمایشات و تغییر شیبها آن قدر تکرار شده‌اند تا تحت شرایط فیزیکی و هیدرولیکی موجود در آزمایشگاه، در جریان متغیر مکانی عبوری از سرریز جانبی پرش هیدرولیکی رخ دهد. از میان این آزمایشات تنها در 9 مورد پرش هیدرولیکی متغیر مکانی برای حالت آزاد جریان در آزمایشگاه مشاهده شد (جدول 2)، چرا که این پدیده آزمایشگاهی بسیار حساس بوده و تحت شرایط فیزیکی و هیدرولیکی بسیار خاص مشاهده می‌گردد. لازم به یادآوری می‌باشد که این پدیده تا کنون در آزمایشگاه به صورت جامع شبیه‌سازی نشده و تحقیقاتی به منظور بررسی کامل خصوصیات آن انجام نگرفته است. لذا با توجه به شرایط بسیار سخت تشکیل این پدیده در آزمایشگاه، احتمال بسیار کم مشاهده آن و نبود هیچ‌گونه سابقه تحقیق قبلی و با در نظر گرفتن حجم آزمایشات انجام شده، این تعداد موفقیت در رؤیت این پدیده و اندازه‌گیری پارامترهای آن به منظور بررسی مدل فیزیکی می‌تواند زمینه‌ای برای مطالعات بعدی در این زمینه باشد.

¹ Point gauge

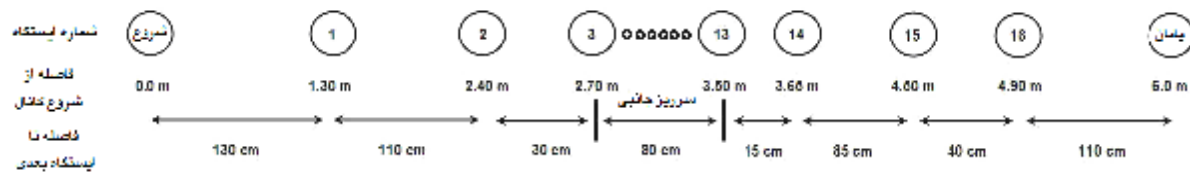
جدول 2- پارامترهای فیزیکی و هیدرولیکی آزمایشات انجام شده با شیبهای مختلف.

عدد فرود بالادست در کانال اصلی Fr_{up}	شیب کانال	$w=4\text{ cm}$	$w=3/5\text{ cm}$	$w=3\text{ cm}$	$w=2/5\text{ cm}$	دبی $Q\text{ (lit/s)}$
0/186 – 0/843	0/0 – 0/002	----	----	----	✓	25
		----	----	----	✓ *	30
		----	✓	✓ *	✓	35
		✓ *	✓ *	✓	✓ *	40

✓ در این حالات پرش هیدرولیکی متغیر مکانی در آزمایشگاه مشاهده شده است.

* در این حالات آزمایشات در تکرار دوم مورد صحت سنجی قرار گرفته اند.

نکته: طول سرریز برای تمام آزمایشات ثابت: $L=80\text{ cm}$



شکل 4- موقعیت و محل ایستگاههای اندازه گیری نسبت به یکدیگر در کانال آزمایشگاهی.

جدول 3- مقایسه آماری داده های برداشت شده آزمایشگاهی برای عمق جریان در تکرارهای اول و دوم آزمایش.

a	MAPE (%)	ME (cm)	RMSE (cm)	R^2	مشخصات آزمایش
0/9988	2/4117	-0/0123	0/1639	0/9791	$Q = 30\text{ L/s}$ & $w = 2.5\text{ cm}$
0/9941	1/7812	-0/0511	0/1495	0/9884	$Q = 40\text{ L/s}$ & $w = 2.5\text{ cm}$
0/9909	2/7717	-0/0452	0/2114	0/9682	$Q = 35\text{ L/s}$ & $w = 3\text{ cm}$
0/9978	1/5638	-0/0067	0/1462	0/9872	$Q = 40\text{ L/s}$ & $w = 3.5\text{ cm}$
1/0010	0/9845	0/0100	0/1030	0/9931	$Q = 40\text{ L/s}$ & $w = 4\text{ cm}$



$w = 2/5\text{ cm}$ و $Fr = 1/127$ ، $Q = 40\text{ L/s}$ (b)



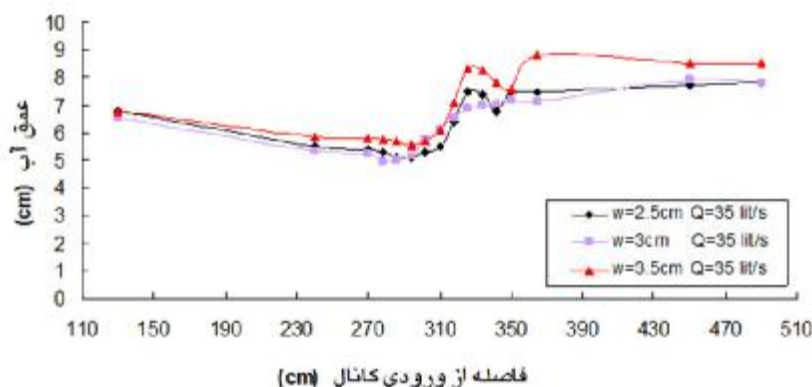
$w = 3\text{ cm}$ و $Fr = 1/214$ ، $Q = 35\text{ L/s}$ (a)

شکل 5- تشکیل پرش هیدرولیکی متغیر مکانی بر روی تاج سرریز جانبی.

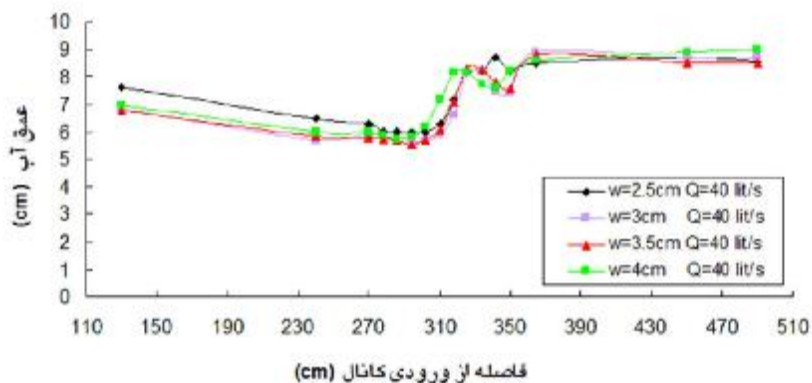
بررسی پروفیل‌های سطح آب

پروفیل‌های سطح آب مشاهداتی، در اکثر موارد دارای شکلی تقریباً یکسان و همراه با نوساناتی در سطح خود می‌باشند. البته واضح است که این موضوع را نمی‌توان به پرش‌هایی دیگری که در آزمایشگاه تشکیل نشده و مشاهده نشده‌اند تعمیم داد. اشکال 6 و 7 نشان می‌دهند که فرم عمومی پرش‌ها تقریباً یکسان

بوده و حتی نوسانات آنها تقریباً یک شکل و شبیه به هم می‌باشد. با توجه به اینکه در دبی 25 و 30 لیتر در ثانیه، پرش تنها برای ارتفاع تاج 2/5 سانتیمتر مشاهده شده است، نمی‌توان پروفیل جریان در این دو دبی را با پروفیل دیگری مقایسه نمود. بنابراین مقایسه‌ها به صورت شکل‌های 6 و 7 می‌باشند.



شکل 6- مقایسه پروفیل‌های سطح آب برای دبی $Q=35 L/s$ و ارتفاع‌های تاج متغیر.



شکل 7- مقایسه پروفیل‌های سطح آب برای دبی $Q=40 L/s$ و ارتفاع‌های تاج متغیر.

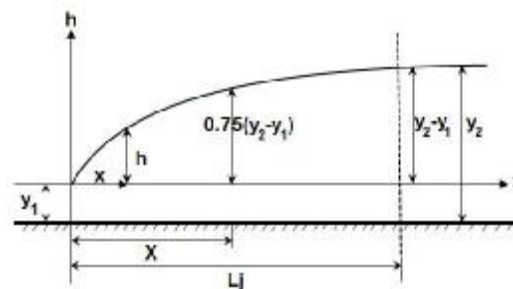
در شکل 6 پروفیل جریان برای دبی 35 لیتر در ثانیه و ارتفاع تاج 2/5 سانتیمتر، پایین‌تر از پروفیل جریان در همین دبی با ارتفاع تاج 3/5 سانتیمتر قرار دارد. همچنین پروفیل‌های سطح آب در دبی 40 لیتر بر ثانیه عمق آب بیشتری را نسبت به دبی 35 لیتر در ثانیه نشان می‌دهند.

همان‌گونه که در شکل‌های 6 و 7 مشخص است تغییرات ارتفاع تاج در یک دبی ثابت، تغییرات نسبتاً محسوسی در پروفیل سطح آب ایجاد می‌کند. انتظار می‌رفت با کاهش ارتفاع تاج در یک دبی ثابت به دلیل افزایش دبی خروجی از سرریز، پروفیل آب به سمت پایین‌تر نقل مکان کند که این اتفاق رخ داده است و در شکل‌های 6 و 7 قابل ملاحظه می‌باشد. به عنوان مثال

محاسبه پروفیل سطح آب در پرش هیدرولیکی متغیر مکانی

تا کنون اشخاصی نظیر سابرامانیا و هاگر فرمول‌هایی برای محاسبه پروفیل سطح آب در طول پرش هیدرولیکی ارائه داده‌اند (فرهودی 1379، شفافی بجزستان 1383)، اما چنین فرمولی برای بدست آوردن پروفیل سطح آب در پرش هیدرولیکی متغیر مکانی وجود ندارد (قبادیان 1390). لذا به منظور ترسیم پروفیل سطح آب در محل وقوع پرش هیدرولیکی متغیر مکانی ارائه رابطه جدیدی بین اعماق اولیه و ثانویه پرش ضرورت دارد. برای تحقق این هدف، در این تحقیق روش سابرامانیا به عنوان پایه محاسبات در نظر گرفته شده و با کالیبره کردن این روش برای آزمایشات تحقیق حاضر، روشی برای تعیین پروفیل سطح آب در پرش هیدرولیکی متغیر مکانی پیشنهاد شده است.

در روش ارائه شده مقدار پارامتر X که نشان‌گر خصوصیات طولی (فاصله از محل پرش) است (شکل 8) برای پرش هیدرولیکی متغیر مکانی و داده‌های مدل آزمایشگاهی کالیبره شده است. اما با توجه به اینکه کالیبره کردن برخی پارامترها که نشان دهنده خصوصیات ارتفاعی پرش و یا در واقع میزان رشد ارتفاعی پرش در مقاطع مختلف است (فرهودی 1379) مشکل می‌باشد و نیاز به آزمایشات متعدد دارد، از کالیبره کردن آن صرف‌نظر می‌شود. اما با این وجود، نتایج کالیبراسیون بازهم بسیار رضایت‌بخش بوده که در ادامه به بررسی آن پرداخته شده است.



شکل 8- شکل توصیفی پروفیل پرش هیدرولیکی (فرهودی، 1379).

برای این منظور ابتدا مقدار $0.75(y_2 - y_1)$ برای اعماق اولیه و ثانویه پرش‌های مشاهده شده در آزمایشگاه محاسبه گردید. پس از آن با در نظر گرفتن شکل 8، مقدار h به ازای $0.75(y_2 - y_1) + y_1$ محاسبه شد. سپس با در نظر گرفتن پروفیل پرش‌های مشاهداتی و مشخص کردن محل وقوع h در آزمایشگاه، مقدار پارامتر X بدست آمد، چرا که پارامتر طولی X محل وقوع عمق پرش آب $h = 0.75(y_2 - y_1) + y_1$ را نشان می‌دهد. بعد از آن مقادیر X / y_1 و Fr_1 محاسبه شده و رابطه جدید که مشابه رابطه سابرامانیا است بین این دو پارامتر محاسبه گردید. رابطه بدست آمده به صورت زیر می‌باشد:

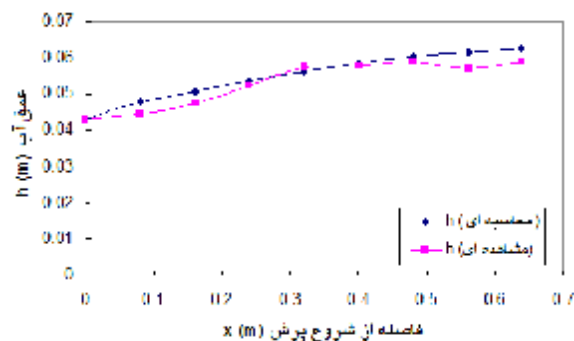
$$\frac{X}{y_1} = -11.795 Fr_1 + 21.708 \quad [3]$$

این رابطه برای محدوده اعداد فرود در عمق اولیه پرش هیدرولیکی متغیر مکانی (Fr_1) بدست آمده در این تحقیق یعنی $1/226 - 1/062$ و اعداد فرود جریان بالادست یعنی $0/843 - 0/189$ کاربرد دارد. البته شایان ذکر است که با توجه به شرایط هیدرولیکی خاصی که برای وقوع این پرش لازم است (ملایم بودن شیب کانال بالادست سرریز)، برخورد با اعداد فرود خارج از این محدوده ممکن اما بسیار دشوار می‌باشد. با داشتن خصوصیات جریان در مقطع عمق اولیه پرش، می‌توان از معادله (3) مقدار X را برای هر پرش خاص محاسبه کرد. این پارامتر نشان‌گر خصوصیات طولی در هر پرش خاص می‌باشد. سپس با هر مقدار x پارامتر I به شکل زیر بدست می‌آید:

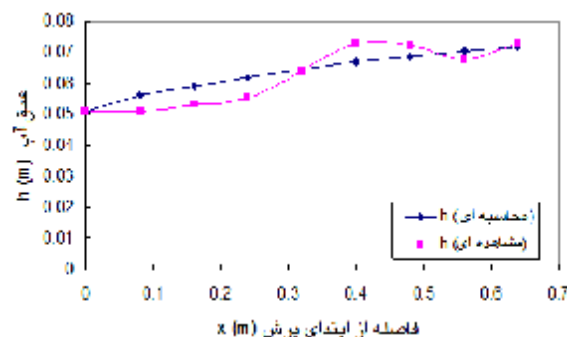
$$I = x / X \quad [4]$$

سپس با محاسبه I ، مقدار متناظر آن h از جدول ارائه شده توسط سابرامانیا بدست می‌آید (فرهودی 1379). اکنون با محاسبه I و h در فاصله x از ابتدای پرش، به راحتی می‌توان مقدار h یا عمق آب در پروفیل پرش را برای آن فاصله (x) به صورت زیر بدست آورد:

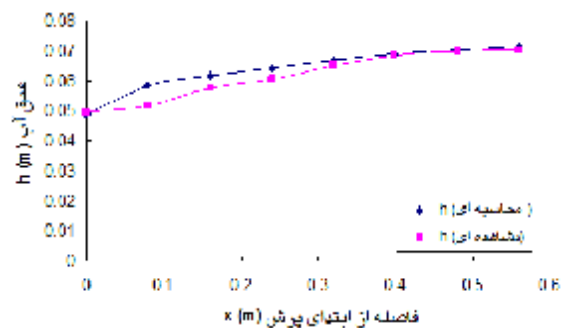
شکل‌های ترسیم شده، توانایی این روش را در برآورد پروفیل سطح آب در پرش هیدرولیکی متغیر مکانی نمایان می‌سازد.



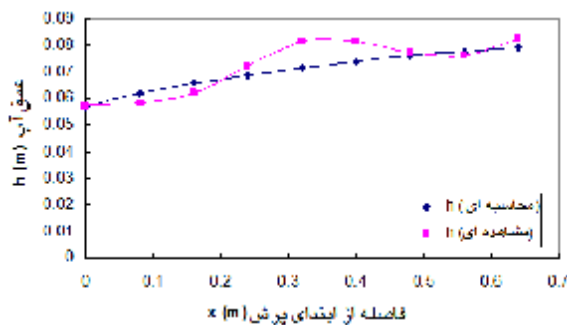
$w = 2/5 \text{ cm}$ و $Q = 25 \text{ L/s}$



$w = 2/5 \text{ cm}$ و $Q = 35 \text{ L/s}$



$w = 3 \text{ cm}$ و $Q = 35 \text{ L/s}$



$w = 4 \text{ cm}$ و $Q = 40 \text{ L/s}$

شکل 9- مقایسه پروفیل‌های مختلف از روش سابرامانیای کالیبره شده و پرش هیدرولیکی متغیر مکانی آزمایشگاهی.

جدول 4- مقایسه آماری روش سابرامانیای کالیبره شده با داده‌های آزمایشگاهی برای تخمین پروفیل پرش متغیر مکانی.

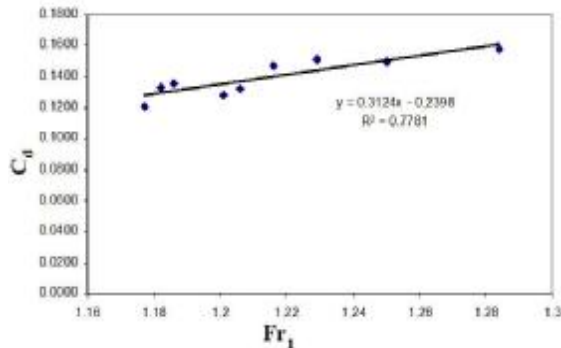
a	MAPE (%)	ME (cm)	RMSE (cm)	مشخصات آزمایش
0/9091	1/2321	0/1773	0/2551	$Q = 25 \text{ L/s}$ & $w = 2.5 \text{ cm}$
1/0023	4/6488	0/0071	0/5154	$Q = 30 \text{ L/s}$ & $w = 2.5 \text{ cm}$
0/9862	3/1973	0/1071	0/4330	$Q = 35 \text{ L/s}$ & $w = 2.5 \text{ cm}$
1/0179	4/5617	-0/0907	0/5785	$Q = 40 \text{ L/s}$ & $w = 2.5 \text{ cm}$
0/9662	1/9410	0/2217	0/3264	$Q = 35 \text{ L/s}$ & $w = 3 \text{ cm}$
0/9594	7/9618	0/3039	0/7061	$Q = 40 \text{ L/s}$ & $w = 3 \text{ cm}$
0/9649	3/6681	0/2479	0/4659	$Q = 35 \text{ L/s}$ & $w = 3.5 \text{ cm}$
1/0092	5/2048	-0/0338	0/6036	$Q = 40 \text{ L/s}$ & $w = 3.5 \text{ cm}$
1/0284	3/0563	-0/1864	0/4864	$Q = 40 \text{ L/s}$ & $w = 4 \text{ cm}$

$$h = 0.75h(y_2 - y_1) \quad [5]$$

جدول 4 و شکل 9، به ترتیب مقایسه‌های آماری و نمودارهای مقایسه‌ای پروفیل محاسبه شده با روش سابرامانیای کالیبره شده و پروفیل‌های مشاهداتی در آزمایشگاه را نشان می‌دهند. مقایسه‌های آماری و

عدد فرود در ابتدای پرش (Fr_1) با $R^2=0/778$ بدست آمد که در رابطه (6) ارائه شده است:

$$C_d = 0.312Fr_1 - 0.2398 \quad [6]$$



شکل 11- تغییرات ضریب تخلیه سرریز جانبی در حالت وقوع پرش هیدرولیکی متغیر مکانی به ازای عدد فرود بالادست.

همچنین در جدول (5) ضرایب تخلیه سرریز جانبی در محدوده پرش هیدرولیکی که توسط رابطه (6) محاسبه شده و با ضرایب تخلیه به دست آمده از آزمایشگاه در این محدوده مورد مقایسه آماری قرار گرفته است.

جدول 5- مقایسه آماری ضریب تخلیه تئوریک محاسباتی و آزمایشگاهی.

شاخص آماری	MAPE (%)	ME (cm)	RMSE (cm)
پارامتر مورد بررسی: C_d	3/7346	0/0003	0/005

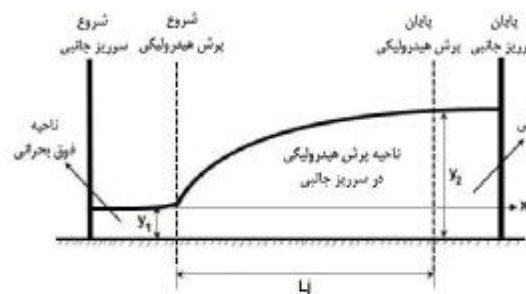
بررسی شاخص‌های آماری نشان می‌دهد رابطه (6) به خوبی قادر به تخمین ضریب تخلیه سرریز جانبی در محدوده پرش هیدرولیکی متغیر مکانی می‌باشد و از رابطه مذکور می‌توان برای تعیین این پارامتر هیدرولیکی استفاده نمود.

نتیجه‌گیری کلی

آبگیری به روش ثقلی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، چرا که از مزایای مهم آن پیوسته بودن آبگیری و عدم صرف انرژی اضافی می‌باشد. یکی از

ضریب تخلیه سرریز جانبی در حالت وجود پرش هیدرولیکی متغیر مکانی

در حالتی که در محدوده سرریز جانبی پرش هیدرولیکی رخ می‌دهد، معمولاً سه ناحیه مشاهده می‌گردد¹ (شکل 10). به ترتیب از ابتدای سرریز، ناحیه فوق‌بحرانی، ناحیه پرش هیدرولیکی متغیر مکانی و ناحیه زیربحرانی بعد از پرش. ضریب تخلیه نواحی اول و سوم به دفعات توسط محققین مختلف مورد بررسی قرار گرفته و فرمول‌های متعددی برای آنها ارائه شده است (محمدی 1390).



شکل 10- نمایی شماتیک از پرش هیدرولیکی متغیر مکانی.

اما اگر در سرریز جانبی پرش هیدرولیکی رخ دهد، به منظور بسط رابطه‌ای مناسب برای ناحیه‌ای که پرش رخ داده است، برنامه‌ای در محیط برنامه‌نویسی ویژوال بیسیک نوشته شد و با استفاده از معادلات جریان متغیر مکانی، سعی و خطا و روش عددی رانگ کوتای مرتبه 4، دبی در مقاطع شروع و انتهای پرش هیدرولیکی متغیر مکانی محاسبه شد. اختلاف این دو مقدار نشان دهنده آب تخلیه شده از سرریز در مقطع پرش می‌باشد. سپس با استفاده از رابطه (2) ضریب C_d برای حالت‌های مختلف محاسبه شد و به کمک رگرسیون‌گیری، رابطه بهینه بین C_d های محاسباتی و

¹ اگر انتهای پرش در انتهای سرریز جانبی رخ دهد، ناحیه زیربحرانی بعد از پرش در محدوده سرریز جانبی دیده نخواهد شد.

2- روش ارائه شده، شکل پروفیل سطح آب پرش هیدرولیکی در سرریز جانبی را به خوبی تخمین می‌زند. با داشتن Fr_1 و y_1 و استفاده از معادله $X/y_1 = -11.795Fr_1 + 21.708$ ، می‌توان مقدار X را برای هر پرش خاص محاسبه کرد. سپس با هر مقدار x پارامتر I از رابطه $I = x/X$ بدست می‌آید. بعد از آن با محاسبه I ، مقدار متناظر آن h از جدول ارائه شده توسط سابرامانیا بدست می‌آید (فرهودی 1379). اکنون با محاسبه h در فاصله x از ابتدای پرش، به راحتی می‌توان مقدار h یا عمق آب در پروفیل پرش را برای آن فاصله (x) از رابطه $h = 0.75h(y_2 - y_1)$ بدست آورد.

انواع سرریزها که به منظور آبیگری به صورت گسترده از آن استفاده می‌شود، سرریز جانبی است. جریان بر روی سرریز جانبی از نوع جریان متغیر مکانی می‌باشد. در برخی شرایط ممکن است در جریان متغیر مکانی پرش هیدرولیکی رخ دهد. در این تحقیق:

1- پروفیل سطح آب و ضریب تخلیه سرریز جانبی برای شرایطی که در جریان متغیر مکانی پرش هیدرولیکی رخ دهد مورد بررسی قرار گرفت. شکل پروفیل‌های سطح آب در پرش‌ها تقریباً یکسان بوده و با کاهش ارتفاع تاج در یک دبی ثابت به دلیل افزایش دبی خروجی از سرریز، پروفیل آب به سمت پایین‌دست نقل مکان می‌کند.

3- به منظور تخمین ضریب تخلیه سرریز جانبی در محدوده پرش هیدرولیکی متغیر مکانی می‌توان از رابطه $C_d = 0.312Fr_1 - 0.2398$ استفاده نمود.

منابع مورد استفاده

- برقعی س م و صالحی ح، 1382. بررسی ضریب دبی سرریز جانبی با استفاده از مدل آزمایشگاهی. صفحه‌های 3 تا 10، ششمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان.
- حسینی م و ابریشمی ج، 1379. هیدرولیک کانال‌های باز. دانشگاه امام رضا (ع).
- سامانی ح م و، 1384. مدل ریاضی یک بعدی هیدرولیک سرریزهای جانبی در شرایط وقوع پرش هیدرولیکی. مجله علوم دانشگاه شهید چمران اهواز، شماره 13، صفحه‌های 1 تا 15.
- شفاعی بجستان م، 1383. جریان در کانال‌های باز (ترجمه). دانشگاه شهید چمران اهواز.
- فرهودی ج، 1379. جریان در آبراه‌های روباز (ترجمه). دانشگاه ارومیه
- قبادیان ر، 1390. شبیه‌سازی آزمایشگاهی و عددی جریان عبوری از سرریز جانبی در شرایط وجود پرش هیدرولیکی. طرح پژوهشی کد 302، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی کرمانشاه.
- قبادیان ر، یعقوبی م و نیکروش س، 1387. تهیه مدل کامپیوتری محاسبه پروفیل جریان در شرایط وجود پرش هیدرولیکی در محدوده سرریز جانبی. هفتمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه صنعت آب و برق شهید عباس-پور، تهران.
- قدسیان م، 1376. ضریب دبی المانی سرریزهای جانبی مستطیلی شکل. صفحه‌های 36 تا 42، چهارمین کنفرانس بین-المللی مهندسی عمران، تهران.
- محمدی ک، 1390. ارائه مدل کامپیوتری شبیه‌ساز پروفیل سطح آب در سرریزهای جانبی تحت شرایط وجود پرش هیدرولیکی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.

- Emiroglu M E, Kaya N and Agaccioglu H, 2010. Discharge capacity of labyrinth side weir located on a straight channel. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE* 136(1): 37-46.
- Khorchani M, and Blanpain O, 2004. Free surface measurement of flow over side weirs using the video monitoring concept. *Journal of Flow Measurement and Instrumentation* 15(2): 111-117.
- Oliveto G, Biggiero V, and Fiorentino M, 2001. Hydraulic features of supercritical flow along prismatic side weirs. *Journal of Hydraulic Research* 39(1): 73-82.
- Ramamurthy A S, Qu J, and Vo D, 2006. Nonlinear PLS method for side weir flows. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE* 132(5): 486-489.
- Singh R, Manivannan D, and Satyanarayana T, 1994. Discharge coefficient of rectangular side weirs. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE* 120(4): 814 – 819.
- Subramanya K, and Awasthy S C, 1972. Spatially varied flow over side weirs. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 98(1): 1-10.
- Swamee P K, Pathak S K., Mohan M, Agrawal S K, and Ali M S, 1994. Subcritical flow over rectangular side weir. *Journal of Irrigation and Drainage Division ASCE* 120: 212-217.